

## ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу Борисюка Вадима Миколайовича  
«Механічні властивості та фазові переходи  
в  $Ti_{n+1}C_n$  максенах і металевих наноматеріалах  
під дією зовнішнього впливу деформації та температури»,  
яку подано на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук  
зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла

Дисертаційна робота пана Вадима Миколайовича Борисюка стосувалася дослідження фізичних властивостей нових наноматеріалів — квазидвовимірних карбідів титану (так званих максенів) і металевих наночастинок. В роботі виконано розрахунки окремих механічних і структурних параметрів для зазначених матеріалів, проведено опис поведінки зразків з них під зовнішнім впливом деформації та високих температур, розроблено теоретичні моделі, що уможливають проводити дослідження поведінки зразків і за інших умов.

Актуальність роботи зумовлено тим, що на сьогодні значну кількість прикладних і фундаментальних досліджень спрямовано на вивчення можливостей застосування різноманітних нанотехнологій для проектування та створення технологічних пристроїв з поліпшеними характеристиками. Про це свідчить, наприклад, використання технологічних процесів виробництва електронних систем з поступовим зменшенням їхніх розмірів до десятків нанометрів, а також загальна тенденція до зменшення розмірів компонентів приладів і механізмів. У такій ситуації, в свою чергу, створюється попит на пошук, синтезу та вивчення нових наноматеріалів з певними властивостями, які активно використовуються в сучасних наукових і прикладних розробках. В дисертаційній роботі пана В. М. Борисюка вивчалися квазидвовимірні матеріали та нанорозмірні системи, які можуть бути застосовані в різних нанотехнологічних пристроях. Так, квазидвовимірні карбіди титану (максени) мають потенціал широкого застосування в електрохімії, а також для створення гібридних матеріалів і композитів, поліпшення механічних властивостей полімерних сполук, у біомедицині й інших галузях. Теж саме стосується металевих наночастинок. Для дослідження цих матеріалів у даній роботі було запропоновано оригінальні методики, розроблені в рамках широко використовуваних метод, а також, поряд з цим, застосовано загально відомі підходи. Отже, дослідження, що було виконано в дисертаційній роботі, є обґрунтованим за актуальністю.

*Мета* дисертаційної роботи пана В. М. Борисюка полягала у встановленні закономірностей структурних змін і фазових переходів у квазидвовимірних карбідах титану та металевих наночастинок під різного типу зовнішній дії, а також у з'ясуванні зв'язку цих перетворень із фізичними властивостями досліджуваних зразків.

Для досягнення мети дисертаційної роботи здобувачем було запропоновано й оригінальний теоретичний підхід, який дав змогу вперше провести дослідження механічних властивостей квазидвовимірних карбідів титану методами класичної молекулярної динаміки. Проведені дослідження уможливили розрахувати деякі фізичні параметри максенів і металевих наноструктур, експериментальне мірвання яких є дуже складним завданням, що потребує високоякісного обладнання та спеціальних методик.

Роботу було виконано на кафедрі наноелектроніки та модифікації поверхні Сумського державного університету в рамках ряду держбюджетних науково-дослідних тем (2011–2020 рр.), у двох з яких здобувач був науковим керівником. Також зазначу, що частину результатів, яких представлено в дисертації пана В. М. Борисюка, а саме, дані стосовно механічних властивостей  $Ti_{n+1}C_n$ , було одержано в рамках стажування у групі проф. Ю. Г. Гогоці, де власне в 2011 році й було винайдено максени.

Також варто відзначити окремо, що, як відомо мені, за результатами наукової роботи, яких також викладено в дисертації, Вадим Миколайович Борисюк є лавреатом Премії Верховної Ради України найталановитішим молодим ученим в галузі фундаментальних і прикладних досліджень та науково-технічних розробок



(2018 р).

Сама ж дисертація пана В. М. Борисюка є лаконічним викладом повністю завершеного дослідження і містить елементи *новизни*, що пов'язані, насамперед, із теоретичними розрахунками й описом поведінки зразків досліджених матеріалів при зовнішніх впливах різних видів. Розв'язання наукових задач, яких було поставлено перед дисертаційною роботою, привело до одержання *нових* наукових результатів, що мають фундаментальне та прикладне значення. Ці результати у дисертації й авторефераті було сформульовано здобувачем. Серед них, зокрема, відмічу наступні.

1. Розроблено оригінальний теоретичний модель, що ґрунтується на методі класичної молекулярної динаміки, який може бути використаним для дослідження поведінки зразків квазидвовимірних карбідів титану  $Ti_{n+1}C_n$  під зовнішньою дією деформації та температури.

2. Вперше описано динаміку руйнування зразків  $Ti_{n+1}C_n$  із  $n = 1, 2, 3$  на атомарному рівні та визначено зв'язок товщини зразка і механізмів руйнування. Показано, що під час розтягування максенів  $Ti_{n+1}C_n$  проявляється так званий «ефект швидкості деформації».

3. Вперше для максенів  $Ti_{n+1}C_n$  проведено моделювання вигинальної деформації методом класичної молекулярної динаміки. Вперше розраховано цупкість щодо вигину й ефективний коефіцієнт цупкості, у результаті чого підтверджено припущення про те, що квазидвовимірний карбід титану  $Ti_2C$  характеризується більшим опором вигинальній деформації, аніж графен. Показано, що цупкість щодо вигину підвищується зі збільшенням товщини зразків максенів.

4. Запропоновано емпіричний модель для вивчення механічних властивостей наноламініатів  $Ti_{n+1}AlC_n$ , у рамках якого досліджено механічні властивості зазначених зразків, розраховано відповідні криві навантаження й ефективні модулі пружності. Вперше через комп'ютерне моделювання перевірено можливість механічного розшарування наноламінату  $Ti_2AlC$  з утворенням квазидвовимірного фрагменту максену  $Ti_2C$ . В рамках розробленого моделю оцінено параметри взаємодії зразок–індентер, за яких відбувається розшарування.

5. Уперше проаналізовано термічну стабільність квазидвовимірних карбідів титану  $Ti_{n+1}C_n$ . Через розрахунок Ліндемманового показника визначено діапазони температур, в яких досліджені зразки зберігають свою квазидвовимірну структуру. Встановлено, що термічне руйнування квазидвовимірних карбідів титану відбувається за значно нижчих температур, аніж графенове топлення.

6. Через розрахунок просторового розподілу Ліндемманового показника та температурних залежностей структурних параметрів визначено наближені значення температур топлення й описано процеси аморфізації для металевих (Au, Ag, Pt, Pd) наночастинок зі структурою «ядро–оболонка» різних хемічних складів і форм.

Структура дисертації та логіка подання матеріалу відображають послідовність розв'язування задач дослідження. Дисертація складається із Вступу, шістьох розділів, загальних висновків, Списку використаних джерел і додатку. Повний обсяг дисертації складає 301 сторінку, містить 137 рисунків і 6 таблиць. Список використаних джерел містить 288 найменувань.

У *Вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено предмет і методи дослідження, висвітлено наукову новизну та практичну значимість одержаних при цьому результатів, наведено інформацію про зв'язок роботи з відповідними науковими програмами та темами, а також інформацію про участь дисертанта у конференціях і семінарах (апробація роботи); зазначено особистий внесок здобувача в опубліковані роботи, яких винесено на захист.

У *першому* розділі дисертації здобувачем проведено огляд літератури за темою дисертаційної роботи. Розділ містить опис основних властивостей, методів синтези, прикладів можливого застосування та наявних результатів досліджень наноматеріалів, які розглядаються в основних розділах роботи. Такими матеріалами є квазидвовимірні карбіди титану, наноламінати  $Ti_{n+1}AlC_n$  (так звані MAX-фази),

що є об'ємними прекурсорами максенів, і металеві наночастинки різних хемічних складів і форм. В окремих підрозділах розглянуто наявні результати експериментів, в яких проведено міряння саме тих (або аналогічних) параметрів матеріалів, розрахунок яких виконано в основних розділах дисертації. Також тут висвітлено альтернативні теоретичні підходи, що використовуються іншими вченими для дослідження обраних в роботі наноматеріалів. Окрім цього, наведено опис наявних методик дослідження, аналоги яких використано здобувачем у власній розвідці.

*В якості зауваження-поваження до першого розділу* зазначу, що дисертант значну увагу приділяє загальному огляду властивостей наноматеріалів, яких розглянуто й у основних розділах дисертації. Це підкреслює актуальність тематики та демонструє увагу й інших вчених до обраних для дослідження наноматеріалів. Але, на мою думку, цікавіше було б детально продемонструвати узгодження та/або відмінності між результатами, одержаними здобувачем, та відповідними даними, наявними в літературі, яких було встановлено іншими методами й іншими дослідниками.

*Другий* розділ дисертації за своїм змістом є її головною частиною. Матеріал, що представлений в даному розділі, опубліковано у рейтингових виданнях, а самі відповідні публікації є найцитованішими у доробку дисертанта. Тут наведено обґрунтування запропонованого теоретичного моделю для дослідження поведінки квазидвовимірних карбідів  $Ti_{n+1}C_n$ , якого побудовано на основі методи класичної молекулярної динаміки. Підхід дисертанта полягав у використанні комбінації напівемпіричних потенціалів міжатомової взаємодії для моделювання матеріалів з різного типу хемічними зв'язками. Так, через аналізу типів хемічних зв'язків у максенах  $Ti_{n+1}C_n$ , дисертантом було обрано напівемпіричний потенціал в рамках методи зануреного атома для опису металічного зв'язку між атомами Титану та емпіричний тричастинковий потенціал для моделювання взаємодії Титан–Карбон. Тут пояснено недоліки та переваги запропонованого підходу. Далі проведено моделювання зразків, що перебувають під дією деформації розтягу, описано динаміку руйнування зразків залежно від товщини та розраховано ефективні модулі пружності. Проаналізовано залежність механічних властивостей зразків від товщини. Одержані результати порівняно з наявними в літературі аналогічними даними для інших квазидвовимірних матеріалів і зроблено відповідні висновки. Також тут проведено розрахунок цупкості щодо вигину для максенів  $Ti_{n+1}C_n$  і досліджено динаміку руйнування зразків під дією вигинальної деформації. Здобувачу вдалося відтворити в експерименті лінійний режим відхилення в центрі зразка для найтоншого максену ( $Ti_2C$ ) й одержати значення цупкості щодо вигину, яке можна порівняти з таким самим параметром для графенового шару, одержаним в аналогічному експерименті. Результати розділу є особливо цікавими, оскільки вони надають можливість кількісно характеризувати пружні властивості наноматеріалів, що може стати у нагоді при проектуванні частин і компонентів певних пристроїв наноелектроніки. Останній підрозділ тут стосується моделювання процесу індентування максенів  $Ti_{n+1}C_n$  абсолютно цупким індентером. Варто зазначити, що дисертантом побудовано криві навантажень для експериментів з різними параметрами взаємодії зразок–індентер, швидкості вдавнення та температури зразка. Але одержані при цьому результати носять здебільшого якісний характер, оскільки не було достатньо обґрунтовано обрані параметри експериментів.

*До цього розділу є п'ять зауважень.* 1) Дисертантом побудовано модель, в якому взаємодію між різними атомами описано різними ефективними напівемпіричними потенціалами. Такий підхід якісно правильно передбачає поведінку зразка, але при цьому просте додавання сил міжатомової взаємодії, розрахованих за різними напівемпіричними потенціалами, в тому числі із ковалентними (тричастинковими) складовими, є кількісно некоректним. Так, наприклад, на атоми Титану, що хемічно зв'язані з атомами Карбону в зразку  $Ti_{n+1}C_n$ , не можуть в той же час діяти ті ж самі (парні) сили, як і в чистому титані, з боку інших атомів Титану. Хоч здобувач частково обґрунтовує використання запропонованого моделю, варто було б надати аргументований перелік тих фізичних ефектів, яких не враховано при такому моделюванні. 2) Не проаналізовано, наскільки ж точним є вико-

ристання формули (2.19) для розрахунку механічних напружень у зразках? В цій формулі з симетрійних міркувань задіяно лише певні компоненти сил і віддалей, хоча, як видно з наведених тут модельних рисунків, атоми в зразку можуть рухатися в усіх напрямках, що може приводити до виникнення додаткових напружень і/або релаксації. 3) Дисертант зазначає відсутність лінійного режиму відхилень для навантажених вигином зразків  $Ti_3C_2$  і  $Ti_4C_3$ , та при цьому на рис. 2.19 залежності мають явно близький до лінійного вигляд; тому варто було б конкретно означити лінійність або ж нелінійність тих чи інших залежностей. 4) Так само, на одній із залежностей на рис. 2.19 (б) є нелінійні ділянки, де збільшенню зовнішньої сили відповідає зменшення відхилення в центрі зразка; та, хоча здобувач пояснює таке пластичними деформаціями, цікаво було б детальніше проаналізувати цей випадок. 5) В останньому підрозділі відсутнє детальне обґрунтування параметрів проведення експериментів, а також порівняння одержаних тут результатів з іншими експериментальними даними.

*Третій* розділ дисертації, що рецензується, стосується дослідження механічних властивостей наноламінатів  $Ti_{n+1}AlC_n$ , а також експериментів з одержання зразків квазидвовимірних карбідів титану шляхом механічного розшарування. Тут дисертант наводить обґрунтування запропонованої теоретичної моделі для дослідження  $Ti_{n+1}AlC_n$ , коротко описує його недоліки та переваги. Аналогічно до попереднього розділу, здобувачем використано комбінацію напівемпіричних міжатомових потенціалів і проведено моделювання поведінки зразків під дією деформації розтягу та розрахунок ефективних механічних характеристик. Одержані значення якісно узгоджуються з експериментальними даними та з розрахунками інших дослідників. Цікавим є відтворення в експериментах так званого «ефекту швидкості деформації», що полягає у зсуванні значення критичної деформації у бік більших значень з підвищенням швидкості деформації. Якісно правильні результати проведених досліджень також підкріплюють релевантність запропонованої моделі та підтверджують можливість використання його для подальших досліджень. Цей розділ також містить результати експериментів з механічного розшарування наноламінату  $Ti_2AlC$  при взаємодії з абсолютно цупким індентером. Дисертанту вдалося встановити параметри експерименту, за яких відбувається утворення квазидвовимірного фрагменту максену  $Ti_2C$ . Варто зазначити, що сама ідея такого експерименту є цікавою, оскільки дає можливість одержати перші уявлення про процеси механічного розшарування на атомарному рівні. Відповідні результати є актуальними з точки зору синтезу максенів як можливої альтернативи щодо хемічного цпавлення. Хоча при цьому також маю зазначити, що результати ще не мають кількісного підтвердження і носять здебільшого демонстративний характер.

*До третього розділу маю три зауваження.* Перше зауваження є аналогічним зауваженню до другого розділу і пов'язане з використанням дисертантом комбінації різних напівемпіричних міжатомових потенціалів: так само, в запропонованому здобувачем моделі для  $Ti_{n+1}AlC_n$  до металічних атомів прикладаються сили, які не можуть діяти в зразку одночасно, але в даному випадку обставини додатково ускладнюються наявністю ще одного (третього) хемічного елемента (Al) в зразку, і бажано було б навести з цього приводу аргументовані коментарі. Друге зауваження — до підрозділу 3.2, де дисертант порівнює з літературними даними лише значення одержаних модулів пружності без аналізування того, як узгоджуються з наявними експериментальними даними інші характеристики — критична деформація та критичне напруження. А третє зауваження- побажання стосується потреби у змістовнішому обґрунтуванні тут характеристик експерименту з механічного розшарування наноламінату  $Ti_2AlC$ , таких як значення швидкості індентування, фізико-хемічні параметри матеріалу індентера, сила взаємодії зразок-індентер та інші, що прояснило б практичну цінність одержаних результатів.

*Четвертий* розділ дисертації стосується опису фазових переходів у квазидвовимірних системах. В першому підрозділі розглядаються фазові перетворення в результаті нагрівання та топлення квазидвовимірних зразків  $Ti_{n+1}C_n$ . Дисертантом змодельовано поступове підвищення температури зразків шляхом перемасштабування відповідних компонент швидкостей атомів. Для відстеження динаміки тер-

мічного руйнування зразків розраховано енергії, атомарні конфігурації та структурні параметри, що ефективно залежать від температури. В якості критерію топлення використовуються особливості температурної залежності Ліндемманового показника. Використовуючи цей критерій та іншу супутню інформацію, дисертант розрахував наближені значення температур топлення квазидвовимірних зразків  $T_{i_{n+1}C_n}$ . (Хоча, на мою думку, в даному випадку доцільніше говорити не про топлення, а про термічне руйнування зразків через специфічну конфігурацію експерименту.) За результатами розрахунків показано, що зі збільшенням товщини зразка має також підвищуватися температура термічного руйнування. Здобувач порівняв одержані значення з відомими температурами топлення інших (квази)двовимірних матеріалів. А в наступних підрозділах розглянуто топлення ультратонкого шару мастила, затиснутого між двома атомарно гладкими поверхнями. Проведено динамічне моделювання межового тертя між штапом круглого перерізу та пласкою поверхнею, яких розділено шаром мастильного матеріалу. Розглянуто випадок з товщиною шару мастила у 100 нм. В проведених дослідженнях показано, що під час зсуву поверхонь тертя встановлюється переривчастий режим, який характеризується постійними перетвореннями між рідиноподібним і твердоподібним станами мастильного матеріалу. Такі перетворення розглядаються як фазові переходи другого роду між режимами тертя. Для досліджень трибологічної системи дисертантом було використано методу редукції розмірності. Також тут розглянуто модель зсувного топлення, в якому зовнішній адитивний шум впливає на характер поведінки системи. Зі підвищенням інтенсивності шуму збільшується ймовірність переходів між твердоподібним і рідиноподібним станами. Проаналізовано випадок, в якому реалізується самоподібна поведінка системи, коли функція густини розподілу для часової залежності параметра порядку набуває степеневого вигляду. Встановлено умови, за яких система демонструє монофрактальну або мультифрактальну поведінку.

*Моє зауваження до цього розділу* стосується використання Ліндемманового показника в якості критеріального параметра топлення. Здобувачу слід обґрунтовано пояснити, чому значення 0,03 цього показника може бути використаним саме для максенів  $T_{i_{n+1}C_n}$ , адже в наведених у дисертації прикладах літературних джерел для різних наноматеріалів використовують широкий діапазон значень Ліндемманового показника. До того ж, сам дисертант зазначив, що використаний ним модель не відтворює всі хемічні та фазові перетворення в зразку, зумовлені підвищенням температури. І, на мою думку, слід було також приділити увагу тим фізичним і хемічним ефектам, якими було понехтувано при проведенні експериментів, в тому числі комп'ютерного.

*У п'ятому* розділі дисертації досліджено фазові переходи та процеси деформування металевих наночастинок. В розділі загалом розглядаються два типи зовнішнього впливу — це різні види деформації та нагрів. Вплив температури розглянуто на прикладах дослідження термічної стабільності металевих наночастинок зі структурою ядро-оболонка. Згідно з широкозастосованою методикою, дисертантом так само розраховано ефективні температурні залежності усередненої повної потенціальної енергії зразків, Ліндемманового показника, а також функції радіального розподілу атомів у зразках за різних температур. Варто відмітити вдалий, на мою думку, спосіб візуалізації локальних областей топлення наночастинок шляхом побудови атомарних конфігурацій із наведенням значень Ліндемманового показника для кожного з атомів. Такий підхід дає можливість наглядно продемонструвати ділянки зразка, в яких починаються процеси топлення. В такий спосіб було досліджено кілька зразків різного хемічного складу та геометричної форми, проаналізовано вплив на температуру топлення розмірів наночастинок, товщини її оболонки, а також концентрації певних металів. Окрім впливу температури в розділі розглянуто поведінку металевих нанодротів також зі структурою ядро-оболонка за різного типу деформації. Розглянуто деформації розтягу та стиску, а також деформацію зсуву. Для усіх експериментів побудовано криві навантажень і розраховано ефективні значення механічних параметрів. Зважаючи на особливості досліджень, одержані дані не можна перевірити експериментально; тому здобувач

узгоджував розраховані параметри з довідковими даними для відповідних металів і, за наявності, з аналогічними теоретичними розрахунками. Окрім саме оцінених значень механічних параметрів, цікавим результатом дослідження стала візуалізація динаміки руйнування зразків, коли матеріали ядра й оболонки характеризуються різними пластичністю та крихкістю. В результаті можна було спостерігати часткову руйнацію шару оболонки при здебільшого збереженому ядрі нанодропу.

*До цього розділу в мене є непринципове зауваження, яке, мабуть, має характер побажання:* зважаючи на велику кількість проведених розрахунків, дисертанту доцільно було б систематизувати одержані цікаві дані, і це надало б можливість наглядно продемонструвати, наприклад, вплив на температуру топлення таких параметрів як діаметер наночастинки, товщина оболонки або концентрація у ній певного металу.

У заключному шостому розділі дисертації описано дослідження взаємочину срібних наночастинок і квазидвовимірного  $Ti_2C$ . Описано процеси росту срібних наночастинок на поверхні максену та запропоновано теоретичні підходи для оцінювання кількісних характеристик структури поверхні довільних металевих конденсатів. Спочатку тут проведено моделювання процесів осадження атомів Аргентуму на поверхню зразка  $Ti_2C$ . Розглянуто умови, за яких на поверхні максену утворюється ансамбль наночастинок з близькою до сферичної форми або ж спостерігається зростання тонкої плівки срібла товщиною у кілька атомарних шарів. Такі різні умови досягаються через різного типу хемічну взаємодію між атомами, що осаджуються, та підкладкою. Так, оскільки поверхневий шар атомів підкладки й атоми, що осаджуються, є металічними, то здобувач доцільно розглядає металічний тип взаємодії між ними, що в дисертації позначено як «гідрофільний» випадок. Також в роботі змодельовано й «гідрофобний» випадок, коли взаємочин атомів, що осаджуються, та підкладки описано лише Ван дер Ваальсовим взаємодіям. Останній випадок дав змогу дисертанту зафіксувати окрему срібну наночастинку на поверхні квазидвовимірного карбиду. Далі розраховано сили взаємодії між наночастинкою та підкладкою в стаціонарному та кінетичному випадках. Загалом результати перших двох підрозділів стануть особливо корисними при проектуванні та створенні гібридних наноматеріалів. Наступні підрозділи розділу стосуються розрахунків кількісних характеристик структури та мікротопології металевих конденсатів з використанням їхніх електронно-мікроскопічних фотографій. Здобувачем застосовано методики, які уможливають кількісно охарактеризувати складність структури конденсату в процесі росту, параметризувати шерсткість поверхні в залежності від її хемічного складу та відстежувати зміни шерсткості поверхні при зовнішньому впливі. Реалізація таких методик і розраховані параметри ґрунтуються на елементах теорії графів і теорії фракталів. Такий підхід може стати корисним для інженерії поверхневих систем (наприклад трибологічних), коли потрібно кількісно охарактеризувати нерегулярну мікротопологію поверхні, структура якої впливає на роботу приладу.

*Маю зауваження до розділу 6.* На мою думку, без однозначного визначення параметрів експерименту з осадження атомів Аргентуму на поверхню, одержані результати мають якісний, а не кількісний характер, і тому можемо розглядати їх лише як попередні, наближені характеристики. Окрім цього, зважаючи на обмежений час проведення експериментів з осадження, чи можна очікувати, що, після того як пройде достатньо часу, в конденсованій системі утворюватимуться майже однакові конфігурації навіть за різних параметрів експериментів? Також зазначу, що тут не розглянуто явним чином вплив зміни температури підкладки на структурні характеристики та властивості конденсату і тому, зокрема, не вказано, чи змінюватиметься швидкість конденсації металу з підвищенням температури підкладки, а якщо змінюватиметься, то які зміни структурно-фазового стану відбуватимуться при цьому?

На закінчення характеристики дисертації зазначу, що всі зауваження, яких наведено вище, слід, насамперед, розглядати як побажання стосовно оформлення вмісту дисертації та щодо врахування їх при майбутньому розвитку обраного нау-

кового напрямку; вони не можуть понизити загальної оцінки дисертаційної роботи.

Автор дисертації одержав оригінальні та змістовні наукові результати. Теоретичні моделі, запропоновані в дисертаційній роботі пана Вадима Борисюка, здаються мені якісно вірними і такими, що забезпечують обґрунтованість сформульованих наукових висновків. Вірогідність одержаних основних результатів і релевантність висновків дисертації на їхній основі забезпечується використанням загальновідомих фізичних принципів і математичного апарату, узгодженням низки одержаних результатів із наявними експериментальними й теоретичними даними та висновками інших дослідників.

Оцінюючи дисертацію пана В. М. Борисюка у цілому, можу підкреслити, що вона являє собою ґрунтовну наукову працю, в якій з достатньою повнотою викладено всі етапи проведених наукових досліджень. Її результати можуть бути використані в прикладних дослідженнях і розробках пристроїв наноелектроніки, зокрема, при виборі потрібного матеріалу для їхніх певних елементів, а також при створенні гібридних наноматеріалів зі спеціальними властивостями. Так само, одержані результати стануть у нагоді при подальших теоретичних та експериментальних дослідженнях, оскільки розроблені теоретичні моделі дають змогу якісно, а іноді й кількісно прогнозувати поведінку квазидвовимірних наноматеріалів і металевих наночастинок у різних умовах.

Дисертацію представлено ясно та послідовно, при викладенні матеріалу збережено логічний зв'язок між окремими частинами роботи. Текст дисертації грамотно написано науковою українською мовою та логічно структуровано відповідно до вимог ДАК МОН України стосовно оформлення дисертацій.

Результати дисертаційної роботи було опубліковано в 35 наукових працях, серед яких: 11 статей — в іноземних періодичних наукових виданнях, 13 статей — у наукових фахових виданнях України, 1 монографія, 1 глава — у колективній монографії, 7 статей — у матеріалах конференцій, 2 тези доповідей на конференціях; з цих праць 29 робіт було проіндексовано у міжнародних наукометричних базах даних Scopus і/або Web of Science Core Collection. За даними бази даних Scopus індекс Гірша пана В. М. Борисюка складає  $h=11$  із загальною кількістю цитувань  $CI=360$  його публікацій; за даними міжнародної бази даних Google Академія у пана В. М. Борисюка  $h=11$  та  $CI=489$ .

Автореферат та опубліковані роботи достатньо повно віддзеркалюють вміст та основні висновки дисертації.

#### ВИСНОВОК

Отже, дисертаційна робота пана Вадима Миколайовича Борисюка є самостійним, завершеним у цілому (в межах поставлених задач) дослідженням з істотним внеском у дослідження фізичних властивостей квазидвовимірних наноматеріалів і металевих наночастинок.

За актуальністю обраної теми, науковою новизною та значимістю одержаних результатів, ступенем обґрунтованості та вірогідністю сформульованих наукових висновків і рекомендацій, повнотою викладу їх в опублікованих працях дисертація «Механічні властивості та фазові переходи в  $Ti_{n+1}C_n$  максенах і металевих наноматеріалах під дією зовнішнього впливу деформації та температури» задовольняє встановленим критеріям ДАК МОН України щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук, а саме, пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015 та № 567 від 27.07.2016). Тому я вважаю, що автор дисертації, пан Вадим Миколайович Борисюк, безперечно гідний присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук із спеціальності 01.04.07 — фізика твердого тіла.

Директор Інституту металофізики  
ім. Г. В. Курдюмова НАН України  
член-кореспондент НАН України,  
доктор фізико-математичних наук, професор



В. А. Татаренко